



Arnold Hanslmeier

# Das helle und das dunkle Universum

Was uns die Strahlung über  
Himmelsobjekte verrät

EBOOK INSIDE



Springer Spektrum

---

## Das helle und das dunkle Universum

---

Arnold Hanslmeier

# Das helle und das dunkle Universum

Was uns die Strahlung über  
Himmelsobjekte verrät



Springer Spektrum

Arnold Hanslmeier  
Institut für Geophysik  
Universität Graz  
Graz, Österreich

ISBN 978-3-662-54241-5  
DOI 10.1007/978-3-662-54242-2

ISBN 978-3-662-54242-2 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnetet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum  
© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017  
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.  
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.  
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung: Margit Maly

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Germany  
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort

Dieses Buch handelt über Licht im Universum. Licht ist das Einzige, was wir von fernen Sternen, Galaxien messen können. Im Gegensatz zu anderen Wissenschaften ist die Astrophysik auf passive Beobachtung angewiesen; wir können mit Millionen oder gar Milliarden Lichtjahren entfernten Galaxien keine Experimente machen. Dabei verstehen wir unter Licht nicht nur das mit unserem Auge sichtbare Fenster des elektromagnetischen Spektrums, sondern auch Röntgenstrahlung, UV-Strahlung sowie Mikro- und Radiowellen. Wir können heute astronomische Objekte auf allen Wellenlängen untersuchen. Wodurch entsteht Röntgenstrahlung in der Sonne oder Radiostrahlung im Kern unserer Milchstraße? Was sagen die Farben der Sterne aus?

Im ersten Kapitel gehen wir den Fragen nach: Was ist Licht? Ist es eine Welle? Aber es gibt Experimente, die sich nur mit der Annahme erklären lassen, dass Licht aus Teilchen besteht. Die Beantwortung dieser Frage hat völlig neue Entwicklungen der Physik erfordert wie die Quantenphysik.

Zur Beobachtung ferner Galaxien sind immer größere Teleskope erforderlich, und wir geben im nächsten Kapitel einige Beispiele moderner Großteleskope, sowohl von erdegebundenen wie auch von Weltraumteleskopen. Welche Erkenntnisse erhofft man sich von den geplanten neuen Teleskopen?

Astrophysiker leisten Detektivarbeit. Aus der Strahlung der Sterne können sie Informationen über die Temperatur, die Zusammensetzung, das Alter usw. erhalten. Doch wie kann man aus der Zerlegung der Strahlung Informationen über Sterne und ferne Galaxien gewinnen? Woher stammt das Licht der Sonne? Wie wird es erzeugt?

Dann geht die Reise in die Tiefen des Universums, die gleichzeitig auch eine Reise in die Vergangenheit ist. Wir werfen einen Blick auf den Rand des Universums und stellen uns die Frage: Wie weit können wir überhaupt beobachten?

Neben der Quantenphysik hat natürlich die Relativitätstheorie unsere Physik revolutioniert. Hier spielte die Untersuchung des Lichts eine wesentliche Rolle. Zunächst versuchte man die Lichtgeschwindigkeit zu messen. Wir zeigen an einem lustigen Experiment, das jeder in seiner Küche durchführen kann, wie dies geht. Aber es tauchen weitere Fragen auf. Die Entfernung zwischen den Sternen sind unvorstellbar. Können wir mit Lichtgeschwindigkeit reisen? Warum altern wir we-

niger, wenn wir schnell reisen? Ist dies reine Fiktion oder überprüfbar? Was sind die wichtigsten Aussagen der Relativitätstheorie?

Schwarze Löcher kennen sicher viele der Leserinnen und Leser. Bedeuten sie das endgültige Schicksal massereicher Sterne? Was befindet sich im Zentrum von Galaxien?

Wo Licht, da auch Schatten, heißt es. Im Universum ist es ähnlich. Es gibt Hinweise auf nichtleuchtende, dunkle Materie, auf Wellen, die sich völlig anders als Lichtwellen verhalten, sowie auf Teilchen, die extrem leicht sind. Damit gehen wir an die Grenzen der modernen Astrophysik. Erst vor Kurzem wurden Gravitationswellen nachgewiesen. Wir behandeln die wesentlichsten Eigenschaften dieser Störungen der Raumzeit, deren Nachweis extrem schwierig ist. Der Raum, in dem sich Licht ausbreitet, wird durch Massen gekrümmt. Wir bringen einige Beispiele von Gravitationslinsen, aus denen sich auch die Existenz der dunklen Materie herleiten lässt.

Das Buch richtet sich an alle naturwissenschaftlich interessierten Leserinnen und Leser. Es gibt auch zahlreiche Formeln und durchgerechnete Beispiele. Diese Formeln und Beispiele können, ohne dass man den Zusammenhang verliert, überlesen werden oder dienen eben zur Vertiefung.

Ich bedanke mich sehr herzlich bei Frau Dr. Birgit Lemmerer und Frau Mag. Isabell Piantschitsch sowie bei Herrn Dr. Peter Leitner für Korrekturen und Kommentare. Ich bedanke mich auch für die ausgezeichnete Zusammenarbeit mit Springer-Spektrum, besonders mit Frau Meike Barth und Frau Margit Maly. Die Abbildungen sind soweit nicht anders gekennzeichnet frei im Internet verfügbar.

Meiner Lebenspartnerin Anita danke ich für zahlreiche Diskussionen und gemeinsame Sternabende, ebenso meinen Kindern Roland, Christina und Alina.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Licht – was ist das eigentlich?</b>	<b>1</b>
1.1	Licht als Welle . . . . .	1
1.1.1	Was ist eine Welle? . . . . .	1
1.1.2	Mathematische Beschreibung von Wellen . . . . .	3
1.1.3	Elektromagnetische Wellen . . . . .	5
1.1.4	Elektrische und magnetische Felder . . . . .	8
1.1.5	Die Maxwell-Gleichungen . . . . .	8
1.1.6	Ohne Magnetfeld kein Leben . . . . .	9
1.1.7	Licht und elektromagnetische Wellen . . . . .	11
1.1.8	Die Beugung des Lichtes . . . . .	12
1.1.9	Interferenz . . . . .	15
1.1.10	Mit Interferenz mehr Details beobachten . . . . .	18
1.2	Licht als Teilchen . . . . .	20
1.2.1	Newton und Licht . . . . .	20
1.2.2	Einstein und der Fotoeffekt . . . . .	22
1.2.3	Die Strahlung eines schwarzen Körpers . . . . .	23
1.2.4	Der Compton-Effekt . . . . .	26
1.2.5	Teilchen entstehen aus dem Nichts . . . . .	27
1.3	Licht: Welle oder Teilchen oder beides? . . . . .	28
1.3.1	Noch ein Experiment . . . . .	28
1.3.2	Der Welle-Teilchen-Dualismus . . . . .	29
1.3.3	Polarisation . . . . .	30
1.3.4	Polarisation des Himmels . . . . .	32
1.4	Kohärenz . . . . .	32
1.4.1	Auf die Phase kommt es an . . . . .	32
1.4.2	Laser und Maser . . . . .	33
1.4.3	Kosmische Maser . . . . .	35

<b>2 Das Licht einsammeln: Teleskope</b>	37
2.1 Teleskope: Grundprinzip	37
2.1.1 Das Licht bündeln: Linsen	37
2.1.2 Von der Linse zum Teleskop	39
2.1.3 Linsen- oder Spiegelteleskope	40
2.1.4 Teleskop: Kenngrößen	45
2.1.5 Montierungen	46
2.2 Moderne erdegebundene Observatorien	48
2.2.1 Die Wahl des Beobachtungsstandortes	48
2.2.2 Sonnenteleskope	48
2.2.3 Großteleskope zur Nachtbeobachtung	54
2.2.4 Die Erdatmosphäre überlisten	57
2.2.5 Zukünftige Großteleskope	59
2.3 Teleskope im Weltraum	61
2.3.1 Vor- und Nachteile von Weltraumteleskopen	61
2.3.2 Das Hubble-Weltraumteleskop, HST	62
2.3.3 Das Kepler-Teleskop	66
2.3.4 Gaia	68
2.3.5 Das James-Webb-Teleskop	68
2.3.6 Vergleich der modernen Großteleskope	71
<b>3 Licht – die Botschaft der Sterne</b>	73
3.1 Das elektromagnetische Spektrum	73
3.1.1 Das menschliche Auge	73
3.1.2 Das Spektrum: Wir zerlegen das Licht	74
3.2 Von den Röntgenstrahlen zu den Radiowellen	76
3.2.1 Röntgenstrahlung	76
3.2.2 Röntgenteleskope	78
3.2.3 Radioteleskope	80
3.3 Farbe: heiße und kalte Sterne	81
3.3.1 Die Strahlung beschreiben, schwarzer Körper	81
3.3.2 Die Strahlungsgesetze	81
3.3.3 Warum Exoplaneten so schwer zu finden sind	83
3.4 Emissions- und Absorptionslinien	84
3.4.1 Zerlegung des Lichtes	84
3.4.2 Das Wasserstoffspektrum	84
3.4.3 Verschobene Linien: Der Doppler-Effekt	87
3.4.4 Das Universum dehnt sich aus	88
3.5 Helligkeiten und Strahlung der Sterne	89
3.5.1 Die Helligkeiten der Sterne	89
3.5.2 Aus Licht die Entfernung bestimmen	90
3.5.3 Die Temperaturen der Sterne messen	91
3.5.4 Zusammensetzung der Sterne	92
3.6 Sterne nach ihrer Strahlung klassifizieren	93
3.6.1 Das Hertzsprung-Russell-Diagramm	93
3.6.2 Spektralklassen	94

3.6.3	Lebensdauer eines Sternes . . . . .	95
3.6.4	Masse-Leuchtkraft-Beziehung und Entwicklung der Sterne	95
<b>4</b>	<b>Woher kommt das Licht der Sonne? . . . . .</b>	<b>97</b>
4.1	Die Sonne – ein normaler Stern . . . . .	97
4.1.1	Die Oberfläche der Sonne . . . . .	97
4.1.2	Dunkle Flecken – helle Fackeln . . . . .	98
4.1.3	Konvektion . . . . .	99
4.2	Der Aufbau der Sonne . . . . .	101
4.2.1	Das Sonneninnere . . . . .	101
4.2.2	Die Sonne – ein Fusionsreaktor . . . . .	101
4.2.3	Energietransport durch Strahlung . . . . .	103
4.2.4	Die Mitte-Rand-Variation oder; Es wird nach innen hin heißen . . . . .	104
4.3	Eine Tomografie der Sonne . . . . .	105
4.3.1	Die Atmosphäre der Sonne . . . . .	105
4.3.2	Atome verlieren Elektronen . . . . .	105
4.3.3	Temperaturverlauf in der Sonnenatmosphäre . . . . .	107
4.4	Die aktive Sonne . . . . .	109
4.4.1	Sonnenaktivitätszyklus . . . . .	109
4.4.2	Das Weltraumwetter . . . . .	111
<b>5</b>	<b>Eine Reise in die Vergangenheit . . . . .</b>	<b>113</b>
5.1	Sterne und Entfernungen . . . . .	113
5.1.1	Entfernungen der Sterne . . . . .	113
5.1.2	Vermessung von einer Milliarde Sterne . . . . .	115
5.2	Unsere Nachbarschaft . . . . .	116
5.2.1	Der nächste Stern . . . . .	116
5.2.2	Eine Reise zu Alpha Centauri . . . . .	118
5.2.3	Die Umgebung der Sonne . . . . .	119
5.3	Galaxien-Bausteine des Universums . . . . .	121
5.3.1	Wie groß ist das Universum? . . . . .	121
5.3.2	Die Milchstraße . . . . .	125
5.3.3	Durch den Staub hindurchsehen: das galaktische Zentrum .	125
5.3.4	Das Licht und das Alter der Sterne . . . . .	128
5.3.5	Galaxien und Galaxienhaufen . . . . .	129
5.3.6	Galaxien stoßen zusammen . . . . .	131
5.4	Die jüngsten Objekte im Universum . . . . .	133
5.4.1	Von der Erde zum Mond . . . . .	133
5.4.2	Entfernungen im Sonnensystem . . . . .	135
5.4.3	Junge Galaxien und Rotverschiebung . . . . .	135
5.4.4	Entfernungen und Expansion . . . . .	136
5.5	Blick zum Rande des Universums? . . . . .	139
5.5.1	Das Hubble Deep Field . . . . .	139
5.5.2	Wie weit sieht man Galaxien . . . . .	142

5.6	Wie weit sieht man? . . . . .	144
5.6.1	Das Alter des Universums . . . . .	144
5.6.2	Das Universum und der Kühlschrank . . . . .	144
5.6.3	Als das Universum durchsichtig wurde . . . . .	145
5.6.4	Die Hintergrundstrahlung wird gemessen . . . . .	146
6	<b>Lichtgeschwindigkeit und Relativitätstheorie</b> . . . . .	151
6.1	Die Messung der Lichtgeschwindigkeit . . . . .	151
6.1.1	Erste Versuche von Galilei . . . . .	151
6.1.2	Die Zahnradmethode von Fizeau . . . . .	152
6.1.3	Verfinsterung der Jupitermonde . . . . .	153
6.1.4	Eine Tafel Schokolade und die Lichtgeschwindigkeit . . . . .	155
6.1.5	Die Aberration . . . . .	156
6.2	Relativitätstheorie und Lichtgeschwindigkeit . . . . .	157
6.2.1	Wie breitet sich Licht aus? . . . . .	157
6.2.2	Grundpostulate der Relativitätstheorie . . . . .	159
6.2.3	Schwarze Löcher . . . . .	159
6.2.4	Sind schwarze Löcher endgültig? . . . . .	162
6.2.5	Hohe Geschwindigkeiten und Zeitdilatation? . . . . .	163
6.2.6	Reise zu den Sternen . . . . .	165
6.2.7	Längenkontraktion . . . . .	165
6.2.8	Lorentz-Transformation . . . . .	166
6.2.9	Addition von Geschwindigkeiten . . . . .	167
6.2.10	Reisen durch Raum und Zeit . . . . .	167
6.2.11	Relativistische Massenzunahme . . . . .	168
6.2.12	Doppler-Effekt . . . . .	168
6.3	Relativitätstheorie und Raumkrümmung . . . . .	170
6.3.1	Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie . . . . .	170
6.3.2	Raumkrümmung . . . . .	170
7	<b>Das dunkle Universum</b> . . . . .	173
7.1	Dunkle Materie beobachten . . . . .	173
7.1.1	Erste Vermutungen der Existenz dunkler Materie . . . . .	173
7.1.2	Galaktische Rotation . . . . .	174
7.1.3	Gravitationslinsen . . . . .	175
7.2	Was ist dunkle Materie? . . . . .	177
7.2.1	Eigenschaften dunkler Materie . . . . .	177
7.2.2	Baryonische dunkle Materie . . . . .	178
7.2.3	Nichtbaryonische dunkle Materie . . . . .	178
7.2.4	MOND-Hypothese . . . . .	179
7.3	Neutrinos . . . . .	179
7.3.1	Eigenschaften der Neutrinos . . . . .	179
7.3.2	Neutrinos von der Sonne . . . . .	180
7.3.3	Neutrinos von Supernovae . . . . .	182

<b>7.4 Gravitationswellen . . . . .</b>	<b>183</b>
7.4.1 Was ist eine Gravitationswelle? . . . . .	183
7.4.2 Das Spektrum der Gravitationswellen . . . . .	185
7.4.3 Messung von Gravitationswellen . . . . .	186
7.4.4 Wurden Gravitationswellen gefunden? . . . . .	188
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>193</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>195</b>

Licht ist die einzige Information, die wir von den Sternen bekommen. Bevor wir uns damit beschäftigen, wie man aus dieser Information physikalische Parameter der Sterne, wie deren Temperatur, Zusammensetzung usw. bestimmen kann, werden wir uns in diesem Kapitel der Frage zu, was denn Licht physikalisch gesehen eigentlich ist.

Es gab dazu zwei zunächst widersprüchlich erscheinende Theorien:

- Licht, eine Welle? Was schwingt beim Licht, wie breitet sich eine Welle im leeren Raum aus?
- Oder besteht Licht aus Teilchen?

Weshalb gab es diese beiden Vorstellungen über Licht? In einigen Experimenten zeigt Licht typische Welleneigenschaften, in anderen jedoch Eigenschaften eines Teilchens. In der Physikgeschichte gab es daher immer wieder Streit über die wahre Natur des Lichtes.

---

## 1.1 Licht als Welle

In diesem Abschnitt behandeln wir Wellen sowie Experimente, die zeigen, dass Licht ein Wellenphänomen ist.

### 1.1.1 Was ist eine Welle?

Wir alle kennen Wellen: Denken Sie nur an Wasserwellen, die z. B. wunderschön zu beobachten sind, wenn man einen Stein in eine ruhige Wasseroberfläche wirft (Abb. 1.1).



**Abb. 1.1** Eine Wasserwelle. LEIFI Physik

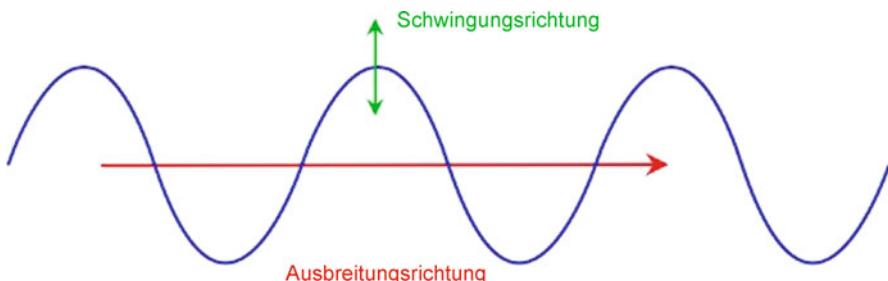
Wir erkennen dann sofort, dass sich Wellen ausbreiten. Physikalisch gesehen kann man eine Welle folgendermaßen charakterisieren:

- Wellen besitzen eine Amplitude (entspricht der Höhe der Wasserwellen).
- Wellen breiten sich aus (Wellen auf einer Wasseroberfläche).

Man kann Wellen noch unterteilen in Longitudinalwellen und Transversalwellen. Transversalwellen schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Dies ist in Abb. 1.2 skizziert.

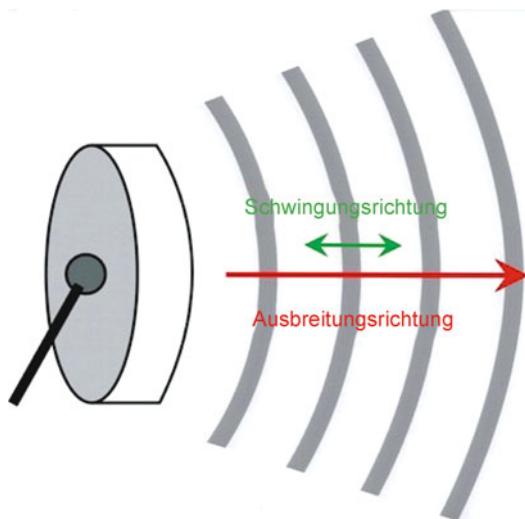
Longitudinalwellen schwingen parallel zur Ausbreitungsrichtung. Betrachten wir ein uns allen bekanntes Beispiel für eine Longitudinalwelle, den Schall. Schall breitet sich in Luft aus, weil Atome und Moleküle in Ausbreitungsrichtung der Schallwelle hin und her schwingen. Ohne Luft gibt es keinen Schall. Auf dem Mond ist es daher totenstill, da keine Atmosphäre vorhanden ist und somit kein Medium, in dem sich die Wellen ausbreiten können. Auch auf der Oberfläche des Planeten Mars ist es sehr ruhig, da der Mars nur eine dünne Atmosphäre besitzt.

In Abb. 1.3 ist die Ausbreitung einer Longitudinalwelle skizziert.



**Abb. 1.2** Eine Transversalwelle. Physik Online

**Abb. 1.3** Eine sich ausbreitende Schallwelle ist eine Longitudinalwelle. Physik-online



Schall entsteht also durch Verdünnungen und Verdichtungen der Luftmoleküle und man kann daher einen Schalldruck bzw. einen Schalldruckpegel angeben, wie in Tab. 1.1 dargestellt.

Transversalwellen kann man sich durch ein schwingendes Seil veranschaulichen.

Die vorhin erwähnten Wasserwellen sind eine Mischform zwischen Transversal- und Longitudinalwellen.

## 1.1.2 Mathematische Beschreibung von Wellen

Dieser Abschnitt ist für jene gedacht, die tiefer in die Materie eindringen möchten, er kann auch übersprungen werden. Unter einer Welle verstehen wir also die Ausbreitung einer Störung in Raum und Zeit. Wellen werden durch eine Wellenfunktion beschrieben, die von Raum und Zeit abhängt:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t). \quad (1.1)$$

**Tab. 1.1** Schall und einige Kenngrößen

	Schalldruckpegel (dB)	Schalldruck ( $\mu\text{Pa}$ )	Empfinden
0	20	Hörschwelle	
20	200	sehr leiser Lüfter	
40	2000	Flüstern	
60	20.000	Sprache	
80	200.000	Hausmusik	
100	2.000.000	Güterzug	
120	20.000.000	Schmerzgrenze	

Dabei bedeutet  $\mathbf{A}$  die Auslenkung am Ort  $\mathbf{r}$  zur Zeit  $t$ . Es gibt eine maximal mögliche Auslenkung, die Amplitude  $\mathbf{A}_0$  einer Welle. Wieder sieht man den Unterschied zwischen einer Transversal- und einer Longitudinalwelle:

- Longitudinalwelle: Ausbreitungsrichtung parallel zur Amplitude,
- Transversalwelle: Ausbreitungsrichtung senkrecht zur Amplitude.

Die Intensität einer Welle ist proportional zum Quadrat der Amplitude. Wellen breiten sich aus und die Richtung dieser Ausbreitung wird durch einen Vektor angegeben, ähnlich wie z. B. die Geschwindigkeit ein Vektor ist. Vektoren zeigen Richtungen an. Vektoren werden durch fett gedruckte Zeichen dargestellt.

Man definiert einen sog. Wellenvektor  $\mathbf{k}$ , der in Ausbreitungsrichtung der Welle zeigt. Es ist:

- $\mathbf{A}_0$  parallel zu  $\mathbf{k}$  bei einer Longitudinalwelle und
- $\mathbf{A}_0$  senkrecht zu  $\mathbf{k}$  bei einer Transversalwelle.

Die Wellenzahl  $k$  ist gleich dem Betrag des Wellenvektors,  $k = |\mathbf{k}|$ . Die Wellenlänge  $\lambda$  ist  $\lambda = 2\pi/k$ .  $\omega$  ist die Kreisfrequenz,  $f$  die Frequenz mit  $f = \omega/2\pi$ . Schließlich gibt es noch die Phase einer Welle  $\phi = \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t$ .

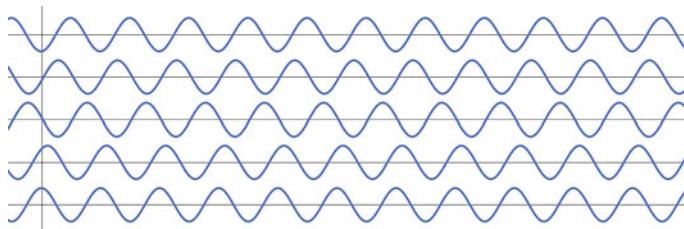
Man kann eine ebene Welle im dreidimensionalen Raum in komplexer Schreibweise folgendermaßen darstellen:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \operatorname{Re} (\mathbf{A}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}) . \quad (1.2)$$

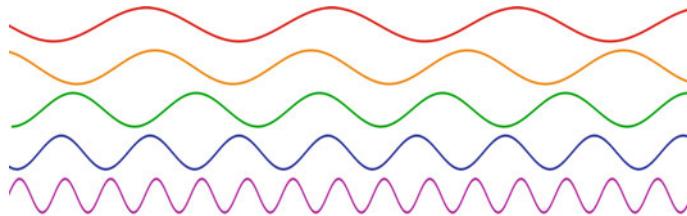
Dabei bedeutet  $\operatorname{Re}$  den Realteil der Funktion. Für eine Kugelwelle:

$$\mathbf{A}(r, t) = \operatorname{Re} \left( \frac{\mathbf{A}_0}{r} e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \right) . \quad (1.3)$$

Abb. 1.4 zeigt phasenverschobene Wellen gleicher Frequenz, Abb. 1.5 phasenverschobene Wellen verschiedener Frequenz.



**Abb. 1.4** Phasenverschobene Wellen gleicher Frequenz. Wikimedia Commons



**Abb. 1.5** Phasenverschobene Wellen unterschiedlicher Frequenz. Wikimedia Commons

### 1.1.3 Elektromagnetische Wellen

Licht ist ein bestimmter Bereich des elektromagnetischen Spektrums, besteht also aus Wellen unterschiedlicher Wellenlänge  $\lambda$  oder Frequenz  $f$ . Zwischen diesen beiden Größen gilt:

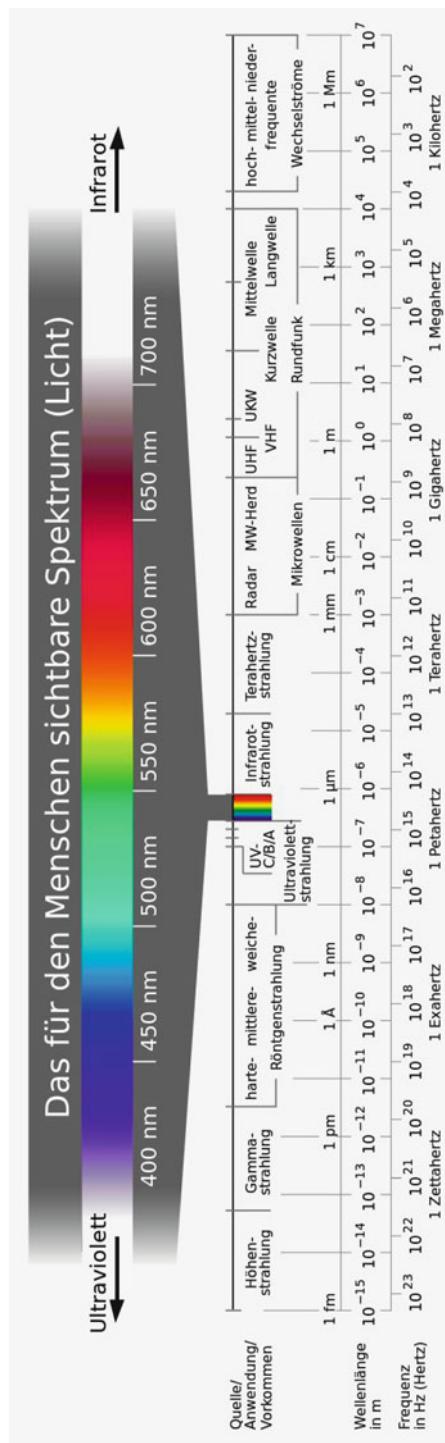
$$c = \lambda/f, \quad (1.4)$$

wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Elektromagnetische Wellen umfassen Radiowellen, Mikrowellen, Licht sowie auch die UV-, Röntgen- und die Gammastrahlung. Es handelt sich dabei um Transversalwellen. Diese Wellen unterscheiden sich von Licht nur durch die Wellenlänge. Das elektromagnetische Spektrum ist in Abb. 1.6 dargestellt.

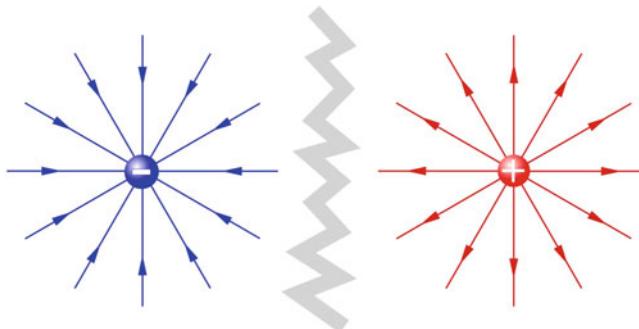
Licht ist eine elektromagnetische Welle und breitet sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  aus. Es ist der für uns sichtbare Teil des elektromagnetischen Spektrums.

Wodurch entstehen elektromagnetische Wellen? Wir unterscheiden zwischen mehreren Mechanismen:

- Spontane Emission: Elektronen können sich nur auf bestimmten Energieniveaus (entspricht Abständen) vom Atomkern befinden. Springen die Elektronen von einem höheren Niveau auf ein tieferes, kommt es zu einer Emission, die genau der Energiedifferenz zwischen den beiden Niveaus entspricht. In verdünnten Gasen kommt es während dieser Übergänge zu keinen Störungen. Man beobachtet deshalb ein Linienspektrum. In Hochstdrucklampen und bei Xenonlicht kommt es infolge der Störungen beim Übergang zu einer Druckverbreiterung, man beobachtet dann kein Linienspektrum mehr.
- Bei starker Beschleunigung von Ladungsträgern kommt es zur Bremsstrahlung. Ein Beispiel dafür ist die Beschleunigung von Elektronen in einem Magnetfeld. Dies passiert z. B. während eines Flareausbruchs auf der Sonne, bei dem innerhalb weniger Minuten Energien freiwerden, die mehreren hundert Millionen Atombomben entsprechen.



**Abb. 1.6** Das elektromagnetische Spektrum. CC-BY-SA3.0



**Abb. 1.7** Ladungen sind Quellen (positive, *rechts*) oder Senken (*links*) elektrischer Felder. CC BY-SA 3.0 Jfmelero

- Molekülschwingungen
- Larmor-Präzession eines Teilchens mit einem magnetischen Moment; diese Präzessionsbewegung erfolgt um die Richtung des äußeren Magnetfeldes.
- Wenn sich Elektronen in elektrischen Leitern bewegen. Bei einer Antenne z. B. gibt es eine periodische Bewegung.

Wellen lassen sich durch die sog. Wellengleichung beschreiben. Sei  $\mathbf{f}$  eine Auslenkung der Welle und  $c$  deren Ausbreitungsgeschwindigkeit, dann lautet die Wellengleichung:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial x^2}. \quad (1.5)$$

Hier wird angenommen: Die Welle bewege sich in  $x$ -Richtung. Ein elektrisches Feld wird durch die sog. elektrische Feldstärke angegeben. Diese ist ein Vektor und beschreibt die Kraft auf eine Ladung  $q$ :

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}. \quad (1.6)$$

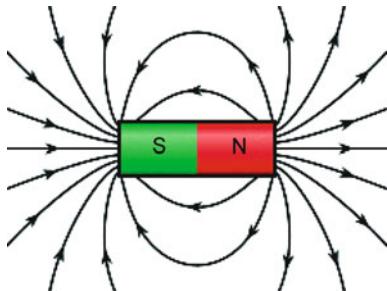
Die Einheit der Ladung ist Coulomb. Die Einheit der Kraft ist das Newton, N. Ein N entspricht ein Joule pro m. Einem Joule entspricht eine Wattsekunde, Ws. Einem Coulomb entspricht die Stromstärke 1 Ampere multipliziert mit einer Sekunde, also A s. Schließlich kann man noch das Volt einführen wie in unterer Gleichung.

$$\frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{J}}{\text{Cm}} = \frac{\text{Ws}}{\text{As m}} = \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (1.7)$$

Wir verwenden also häufig die Einheit Volt pro Meter, V/m für die elektrische Feldstärke. Man kann Felder durch Feldlinien darstellen, die Vektoren zeigen die Richtung des Feldes, die Länge der Vektoren zeigt die Feldstärke. In Abb. 1.7 ist das elektrische Feld für eine negative und eine positive Ladung dargestellt. Bei der positiven Ladung (links, rot) wirkt diese als Quelle des elektrischen Feldes, bei der negativen Ladung (grün, rechts) als Senke.

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Vakuum erfolgt mit Lichtgeschwindigkeit. Weshalb spricht man eigentlich immer von elektromagnetischen Wellen? Dies wird im folgenden Abschnitt gezeigt.

**Abb. 1.8** Ein Stabmagnet besteht aus einem magnetischen Nord- und Südpol. CC BY-SA 3.0, Geek3



### 1.1.4 Elektrische und magnetische Felder

Elektrische Felder haben wir im vorigen Abschnitt kennengelernt. Eine Ladung erzeugt ein elektrisches Feld, das je nach Ladungsvorzeichen eine Quelle (bei positiver Ladung) oder eine Senke (bei negativer Ladung) ist. Wichtig ist, dass es auch Monopole geben kann, also eine Einzelladung, die eben ein Feld um sich herum erzeugt (Abb. 1.7).

Magnetismus ist uns ebenso bekannt. Bestimmte Stoffe wie Eisen sind magnetisierbar. Sie erzeugen dann ein magnetisches Feld; dieses unterscheidet sich jedoch grundlegend vom elektrischen Feld. In Abb. 1.8 ist das magnetische Feld um einen Stabmagneten dargestellt. Ein Stabmagnet besteht aus einem magnetischen Nord- und Südpol, man sagt, er ist bipolar. Die magnetischen Feldlinien gehen vom magnetischen Nord- zum magnetischen Südpol. Was passiert, wenn wir diesen Stabmagneten in der Mitte durchschneiden? Erhalten wir dann magnetische Monopole? Die Antwort ist nein.

Das Magnetfeld besitzt keine Monopole. Es ist quellenfrei.

Wir sehen hier also einen fundamentalen Unterschied zum elektrischen Feld.

### 1.1.5 Die Maxwell-Gleichungen

Die Maxwell-Gleichungen (J.C. Maxwell, 1831–1879) beschreiben das Verhalten elektrischer und magnetischer Felder. Für Nichtmathematiker genügt diese Aussage.

Quellen werden in der Mathematik durch den Divergenzoperator  $\text{div}$  beschrieben. Sei  $\mathbf{A}$  ein Vektor, der z. B. gegeben ist durch  $\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k}$ , dann lautet die Divergenz:

$$\text{div}\mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}. \quad (1.8)$$

Wie wir gesehen haben, sind Ladungen Quellen elektrischer Felder, während Magnetfelder keine Quellen besitzen.

Damit können wir bereits zwei der vier Maxwell-Gleichungen angeben:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0 \quad (1.9)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = \nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (1.10)$$

- Die erste Gleichung sagt also aus, dass die Quelle des elektrischen Feldes  $\mathbf{E}$  eine Ladungsdichte  $\rho$  ist.
- Die zweite Gleichung besagt, dass das Magnetfeld keine Quellen besitzt.

$\epsilon_0$  ist die Dielektrizitätskonstante und  $\mathbf{B}$  ist die magnetische Flussdichte. Diese beiden Gleichungen gelten jedoch für zeitunabhängige Felder. Was passiert, wenn sich elektrische oder Magnetfelder ändern, also die Größe  $\partial / \partial t$  in den Gleichungen vorkommt? Hier kommt der mathematische Operator  $\nabla \times = \text{rot}$ , die Rotation, zum Tragen:

$$\nabla \times \mathbf{A} = \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \mathbf{k}. \quad (1.11)$$

Dann erhalten wir folgende Gesetze:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (1.13)$$

Das klingt sehr kompliziert, ist aber einfach zu interpretieren.

- Ein sich zeitlich veränderndes Magnetfeld ( $\partial \mathbf{B} / \partial t$ ) erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld (gegeben durch  $\nabla \times \mathbf{E}$ ). Das ist die erste Gleichung, die auch als Induktionsgesetz bezeichnet wird.
- Elektrische Ströme, gegeben durch die Stromdichte  $\mathbf{j}$ , sowie sich zeitlich ändernde elektrische Felder erzeugen ein magnetisches Wirbelfeld.  $\mu_0$  ist die sog. Permeabilität des Vakuums.

Wir fassen die dritte und vierte Maxwell-Gleichung zusammen:

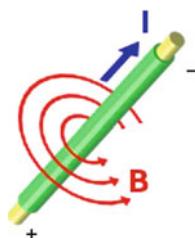
Elektrische und magnetische Felder sind über die zeitabhängigen Maxwell-Gleichungen miteinander verknüpft. Eine zeitliche Änderung der einen Komponente erzeugt die andere.

Betrachten wir einen Draht, also einen stromdurchflossenen Leiter (Abb. 1.9). Der Strom  $I$  soll dabei von + nach – fließen. Gemäß der vierten Maxwell-Gleichung muss dann ein magnetisches Wirbelfeld entstehen, wie durch die Feldlinien angedeutet.

### 1.1.6 Ohne Magnetfeld kein Leben

Gehen wir wieder zu einem praktischen, uns alle betreffenden Fall: Unsere Erde besitzt ein Magnetfeld, das in erster Näherung wie das Feld eines Stabmagneten

**Abb. 1.9** Wenn Ströme fließen, entstehen Magnetfelder.  
CC BY-SA3.0, Maksim



aussieht, also einen magnetischen Nord- und Südpol besitzt. Interessanterweise befindet sich gegenwärtig der magnetische Nordpol auf der Südhalbkugel und der magnetische Südpol auf der Nordhalbkugel, die magnetischen Pole fallen nicht mit den Polen der Rotationsachse der Erde zusammen. Dies ist in Abb. 1.10 skizziert.

Dieses Erdmagnetfeld schützt uns auf der Erdoberfläche vor hochenergetischen geladenen Teilchen, die hauptsächlich von der Sonne kommen (Sonnenwind). Durch den Druck dieser Teilchen werden die magnetischen Feldlinien auf der der Sonne zugewandten Seite zusammengestaucht und auf der Nachtseite auseinandergezogen. Geladene Teilchen können jedoch die magnetischen Feldlinien der Erde kaum durchdringen, unser Magnetfeld schützt so das Leben auf der Erdoberfläche. Würden wir auf der Marsoberfläche leben, gäbe es diesen Schutz kaum, da der Mars kein globales Magnetfeld besitzt.

In Abb. 1.11 ist links die Sonne dargestellt, die sich ausbreitenden Teilchen des Sonnenwindes, rechts das deformierte Magnetfeld der Erde (nicht maßstabsgerecht). Geladene Teilchen werden auch im Erdmagnetfeld gefangen und bilden die Strahlungsgürtel der Erde.

**Abb. 1.10** Das Erdmagnetfeld ist in Erdnähe ähnlich wie das Feld eines Stabmagneten. Die magnetische Achse ist jedoch um etwa  $11^\circ$  gegen die Rotationsachse der Erde geneigt. Simple Aurorae Monitor, SAM

